

Pola Tahanan Jenis dan Konduktivitas Batuan Mengandung Mineral Radioaktif di Botteng dan Takandeang, Mamuju, Sulawesi Barat

Resistivity and Conductivity Pattern of Rock Containing Radioactive Minerals in Botteng and Takandeang, Mamuju, West Sulawesi

Adi Gunawan Muhammad*, Frederikus Dian Indrastomo, I Gde Sukadana

Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir–BATAN,
Jl. Lebak Bulus Raya No.09, Ps. Jumat, Jakarta, 12440

*E-mail: adigm@batan.go.id

Naskah diterima: 29 April 2017, direvisi: 29 Mei 2017, disetujui: 31 Mei 2017

ABSTRAK

Kegiatan penyelidikan umum mineral radioaktif di daerah Mamuju, Sulawesi Barat merupakan tindak lanjut dari hasil pengukuran radioaktivitas lingkungan yang menunjukkan adanya nilai radioaktivitas tinggi. Kandungan mineral radioaktif yang cukup tinggi ditemukan antara lain di Desa Botteng dan Desa Takandeang yang tersusun oleh batuan berkomposisi leusit-basalt tetapi karakteristik bawah permukaan daerah ini belum diketahui. Untuk mengetahui karakteristik geologi bawah permukaan, terkait dengan mineralisasi Uranium dan Thorium di daerah Botteng dan Takandeang, pengukuran geofisika menggunakan metode tahanan jenis dan polarisasi terimbas (*Induced Polarization/IP*) dilakukan. Pengukuran tersebut dilakukan menggunakan konfigurasi Wenner dan dipole-dipole, dimulai dengan pembuatan enam jalur pengukuran, masing-masing tiga jalur: GF/BTGY-01, GF/BTGK-02, dan GF/BTGK-04 di Botteng, dan tiga jalur lainnya: GF/TKDK-01, GF/TKDK-07, dan GF/TKDY-06 di Takandeang. Pengukuran dilakukan dengan memotong arah kemenerusan anomali radiometri permukaan. Hasil pengukuran menunjukkan keterdapatan anomali berada pada sebaran batuan autobreksia yang terlihat jelas di lokasi GF/TKDY-6, GF/TKDK-07, dan GF/BTGK-04. Beberapa indikasi mineralisasi di permukaan teridentifikasi di penampang GF/BTGK-02 dan GF/TKDK-01, dicirikan dengan anomali-anomali chargeabilitas >25,14 ms di lintasan GF/BTGK-02 dan 81,4 ms di GF/TKDK-01. Anomali yang signifikan direkomendasikan sebagai lokasi pemboran.

Kata kunci: Geolistrik, tahanan jenis, uranium, thorium, Mamuju

ABSTRACT

The general investigation activities of radioactive minerals in Mamuju Area, West Sulawesi is a respon of the environmental radioactivity measurement result, which shows the existence of high radioactivity value. High radioactive mineral content found in Botteng and Takandeang Villages. From the outcrops, they composed of leucite-basalt rocks; meanwhile the subsurface characteristics of this area are unknown. To characterize the subsurface geology, related to uranium and thorium mineralization in Botteng and Takandeang area, geophysical measurement conducted using resistivity and Induced Polarization (IP) methods. The measurements carried out using Wenner and dipole-dipole configurations. The measurements started with the creation of six measurement paths where three lines: GF/BTGY-01, GF/BTGK-02, and GF/BTGK-04 are in Botteng and three other lines: GF/TKDK-01, GF/TKDK-07 and, GF/TKDY-06 are in Takandeang. Measurements conducted by crossing the surface radiometric anomaly distribution. The result showed anomaly occurences on autobreccia distribution in GF/TKDY-6, GF/TKDK-07, and GF/BTGK-04 locations. Several mineralization indication on surface identified in GF/BTGK-0, and GF/TKDK-01 sections, charaterized by chargeability anomalies more than 25.14 ms and 81.4 ms respectively. All significant anomalies are recomended as drilling location.

Keywords: Geoelectrical, resistivity, uranium, thorium, Mamuju.

PENDAHULUAN

Penyelidikan pendahuluan mineral radioaktif di Mamuju Sulawesi Barat telah dimulai sejak tahun 2013. Kegiatan tersebut merupakan tindak lanjut dari hasil pengukuran radioaktivitas lingkungan oleh BATAN yang menunjukkan adanya nilai radioaktivitas tinggi mencapai 2.800 nSv/jam [1]. Nilai radioaktivitas tinggi tersebut merupakan radiasi alam atau disebut juga sebagai *Naturally Occuring Radioactive Materials* (NORM), berasal dari sebaran batuan vulkanik di sekitarnya yang mengandung kadar uranium (U), thorium (Th) dan potasium (K) dalam jumlah tinggi [2]. Batuan vulkanik di daerah Mamuju terdiri dari beberapa variasi jenis batuan. Secara regional, batuan vulkanik di daerah ini tersusun atas tuf, lava, dan breksi gunung api berkomposisi leusit-basal sebagai bagian dari Batuan Gunung Api Adang (Tma); dan breksi gunungapi, tuf, dan lava bersusunan andesit-basal sebagai bagian dari Batuan Gunung Api Talaya (Tmtv) [3]. Pengukuran radiometri *soil*/batuan di daerah ini menunjukkan sebaran batuan vulkanik dengan kandungan mineral radioaktif ditemukan pada daerah-daerah tertentu, seperti di Desa Botteng dan Desa Takandeang yang merupakan batuan berkomposisi leusit-basal [2][4]. Nilai radiometri tinggi ini hanya ditemukan di dalam sebaran Batuan Gunung Api Adang (Tma) [3].

Pengamatan citra satelit menunjukkan bahwa vulkanostratigrafi di dalam Batuan Gunung Api Adang (Tma) terdiri dari beberapa gunung api, diantaranya Gumuk Labuhan Ranau, Gumuk Sumare, Gumuk Ampalas, Gumuk Adang, Gumuk Tapalang, Gumuk Ahu, dan Gumuk Botteng [5]. Nilai radiometri tinggi hanya ditemukan di Gumuk Adang, Gumuk Tapalang, Gumuk Ahu, dan

Gumuk Botteng yang tersusun atas batuan *trachyte*, *tephra-phonolite*, *phono-tephrite* dan *phonolite*. Batuan-batuan tersebut merupakan batuan dengan afinitas ultrapotasik yang terbentuk pada tataan tektonik benua aktif dengan kerak benua mikro blok Sulawesi [3].

Pengukuran radiometri permukaan menggunakan spektrometer gamma tipe RS-125 di Desa Botteng dan sekitarnya menunjukkan beberapa lokasi dengan nilai kadar uranium dan thorium mencapai 2.288 ppm eU dan 236 ppm eTh [2]. Mineral radioaktif yang dapat dikenali adalah *gummite*, terdapat pada batuan *tuffities conglomerate* di antara fragmen batuan. Selain itu, akumulasi kadar U dan Th juga terdapat pada batuan vulkanik yang telah mengalami pelapukan dan proses pengkayaan supergen.

Sementara itu, pengukuran radiometri permukaan di Desa Takandeang dan sekitarnya menunjukkan nilai kadar sebesar 426 ppm eU dan 826 ppm eTh. Mineralisasi di daerah ini dikontrol oleh sesar berarah timur laut–barat daya dan alterasi hidrotermal. Akumulasi mineral radioaktif terjadi juga terjadi di sebaran tanah laterit yang mengalami pengkayaan (*supergene enrichment*) [4].

Untuk mengetahui karakteristik geologi bawah permukaan, terkait dengan mineralisasi U dan Th di daerah Botteng dan Takandeang maka pengukuran geofisika dapat dilakukan. Pengukuran geofisika menggunakan metode tahanan jenis dan polarisasi terimbas (*Induced Polarization/IP*) bertujuan untuk mengetahui kondisi batuan di bawah permukaan berdasarkan sifat kelistrikananya. Dengan metode ini, jenis batuan dan sebarannya di bawah permukaan

baik secara lateral maupun vertikal bisa dikenali.

TEORI

Metode Tahanan Jenis

Pengukuran tahanan jenis permukaan didasarkan pada prinsip distribusi potensial listrik oleh elektrode pembawa arus di sekitar tanah. Distribusi potensial ini bergantung pada sifat tahanan jenis batuan, distribusi batuan, dan *soil* di sekitarnya. Pengukuran ini biasanya menggunakan arus DC di antara dua elektrode arus yang ditancapkan di tanah dan mengukur beda potensial pada elektrode yang tidak membawa arus. Elektrode potensial (P) tersebut berada segaris di antara elektrode arus (C). Dari beda potensial yang terukur tadi dapat dihitung nilai tahanan jenisnya [6].

Di dalam hukum Ohm, perbedaan potensial akibat suatu beban (ΔV) berbanding lurus dengan arus listrik (I) dan tahanan listrik (R) yang ditunjukkan oleh persamaan (1) [8]:

$$\Delta V = IR \quad (1)$$

Oleh karena itu, nilai tahanan jenis batuan diketahui dari perbedaan nilai potensial dan kuat arus listrik yang dipancarkan dari alat. Untuk menghitung besarnya tahanan jenis batuan maka rumus dasar di dalam hukum Ohm kemudian diturunkan menjadi persamaan (2) [8]:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2)$$

Nilai tahanan jenis (ρ) suatu material didapatkan dari nilai tahanan listrik yang diukur (R) dikalikan dengan luas penampang material (A) sebanding dengan panjang penampang material (L). Apabila persamaan (1) dimasukkan ke dalam persamaan (2) maka didapatkan formulasi perhitungan tahanan jenis menjadi persamaan (3):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (3)$$

Pengukuran nilai tahanan jenis terhadap beberapa material seperti batuan, tanah, dan mineral menunjukkan kisaran nilai tahanan jenis yang berbeda. Beberapa batuan memiliki nilai tahanan jenis yang sama sehingga pengamatan litologi di lapangan sangat dibutuhkan sebagai kontrol interpretasi litologi [7]. Kisaran nilai tahanan jenis batuan, tanah dan mineral dapat dilihat pada Gambar 1 [8].

Metode Polarisasi Terimbas

Metode tahanan jenis DC memberikan informasi tentang sifat konduktif listrik di bawah permukaan. Sebaliknya, metode IP menargetkan karakteristik kapasitif yang dapat memberi wawasan tambahan tentang sifat fisik dan elektrokimia dari material bawah permukaan. Metode IP secara efektif merupakan perpanjangan dari teknik tahanan jenis DC walaupun pengukurannya lebih menantang dan lebih padat karya (seperti yang dibahas kemudian). Pengukuran empat elektrode dibuat lagi yang dapat dilakukan dalam domain waktu (seperti pada tahanan jenis DC) atau pada domain frekuensi [9]. Fenomena polarisasi terimbas disebabkan oleh dua mekanisme utama, yaitu efek polarisasi membran dan polarisasi elektrode. Polarisasi membran disebabkan oleh adanya mineral lempung di dalam batuan atau sedimen, sementara efek polarisasi elektrode disebabkan oleh karena adanya mineral yang bersifat konduktif di dalam batuan, menyebabkan sebagian dari mineral tersebut bersifat elektrolit (pengaruh air tanah) atau sebagian bersifat elektronik (karena melalui mineral konduktif). Oleh karena itu, efek polarisasi terimbas dikembangkan untuk

mengidentifikasi mineral logam, seperti mineral sulfida [9].

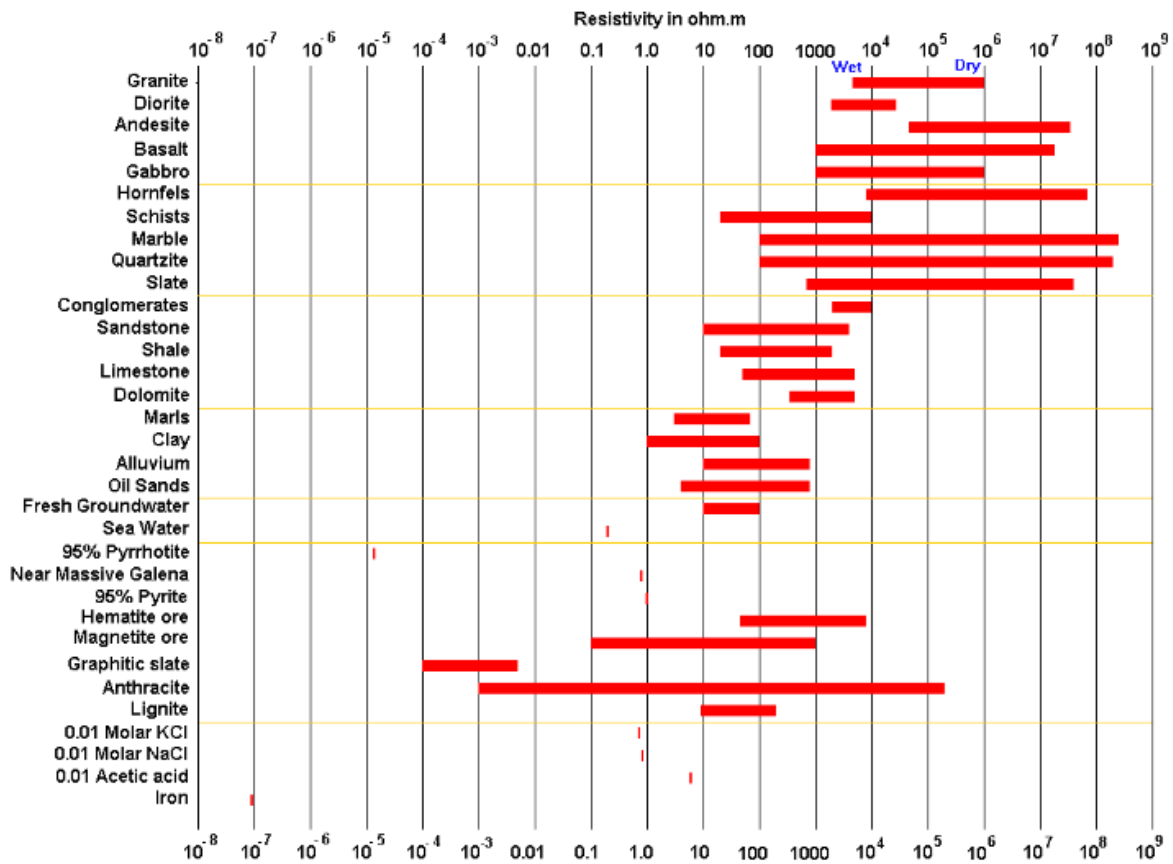
Polarisasi terimbas berhubungan dengan efek penerimaan dan pelepasan arus listrik di permukaan material. Ketika suatu arus diinjeksikan ke permukaan dan beda potensial di antara dua elektrode dihitung maka apabila permukaan tersebut tidak mengalami efek polarisasi maka nilai potensial akan bervariasi tepat mengikuti pola gelombang sumber arus listrik tanpa mengalami jeda. Sebaliknya, apabila permukaan material mengalami efek polarisasi maka nilai potensial akan meningkat dan kemudian turun dengan jeda waktu tertentu [7][10] (gambar 2). Di dalam pelaksanaannya, terdapat dua tipe data pengukuran, yaitu berdasarkan domain waktu

dan domain frekuensi. Ketika arus diinjeksikan ke permukaan, nilai potensial akan meningkat. Apabila arus diputus sebelum mencapai puncaknya maka potensial tidak akan turun seketika menjadi nol tetapi membutuhkan waktu untuk menjadi nol (Gambar 3). Domain waktu didefinisikan sebagai rasio potensial ketika arus dimatikan, $\phi_s(t)$, terhadap nilai maksimum potensial ϕ_n sehingga persamaannya menjadi [10]:

$$M(t) = \phi_s(t) / \phi_n \quad (4)$$

atau sebagai rasio integral dari kurva peluruhan potensial setelah arus dimatikan terhadap potensial maksimum:

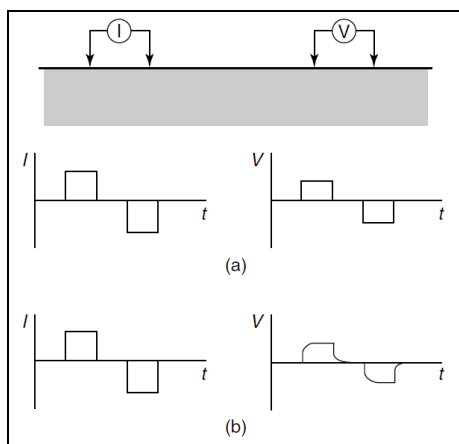
$$M = \frac{1}{\phi_n} \int_{t_1}^{t_2} \phi_s(t) dt \quad (5)$$



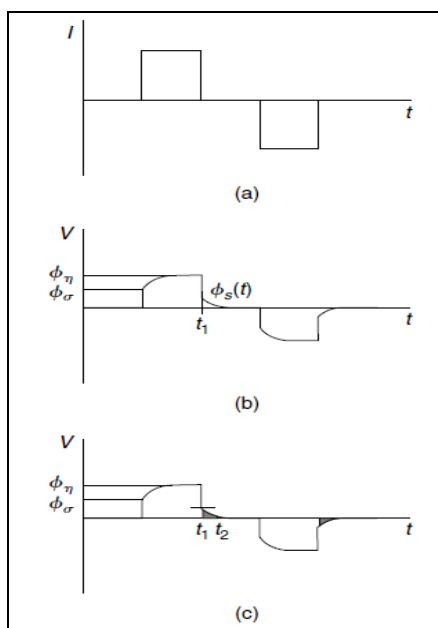
Gambar 1. Referensi nilai tahanan jenis batuan, tanah, dan mineral [8].

Sementara itu, domain frekuensi merupakan *percent frequency effect* (PFE) yang didefinisikan sebagai perbedaan relatif antara tahanan jenis semu dengan frekuensi lebih tinggi, $\rho_a^{f_1}$, dengan frekuensi yang lebih rendah, $\rho_a^{f_2}$, yang dinormalisasi oleh tahanan jenis semu yang tinggi, dalam persen (gambar 3 dan 4) [11]:

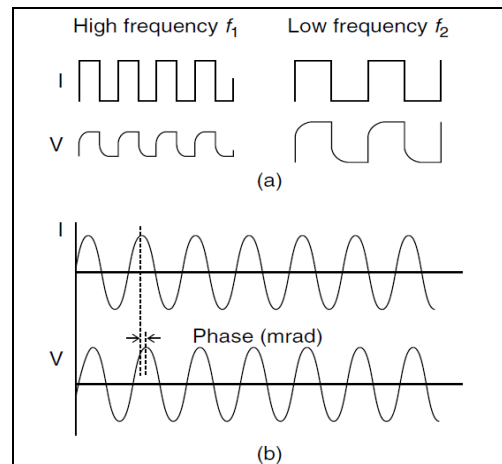
$$PFE = \left(\frac{\rho_a^{f_1} - \rho_a^{f_2}}{\rho_a^{f_1}} \right) \times 100 \quad (6)$$



Gambar 2. Sketsa gelombang potensial ketika arus diinjeksikan ke permukaan tidak terpolarisasi (a) dan terpolarisasi (b) [10].



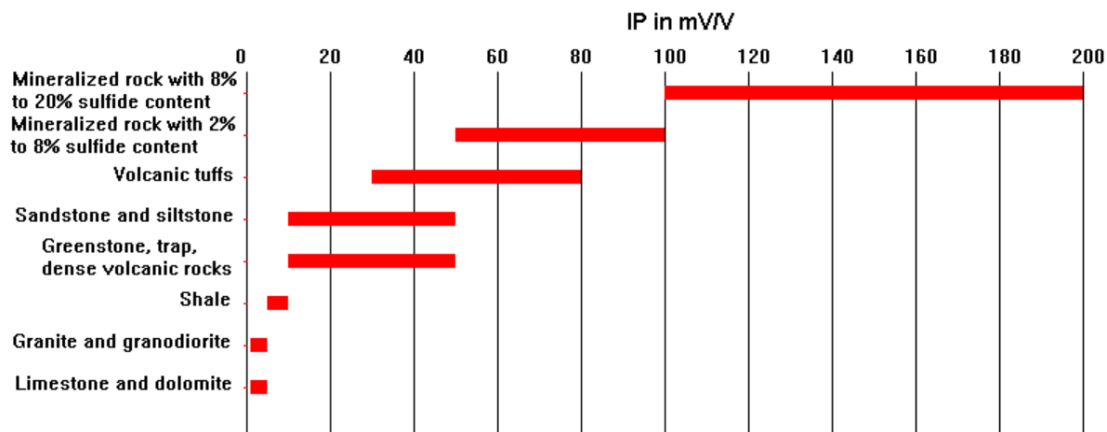
Gambar 3. Polarisasi terimbas dalam domain waktu. (a) injeksi arus vs waktu; (b) chargeabilitas; (c) rasio peluruhan potensial [10].



Gambar 4. Representasi efek polarisasi terimbas dalam domain frekuensi. (a) persentase efek frekuensi (PFE); (b) perbedaan fase antara arus dan potensial [10].

Polarisasi terimbas domain waktu, disebut juga sebagai chargeabilitas umumnya memiliki satuan milivolt per volt (mV/V) atau dalam *milisecond* (ms). Sementara itu, satuan yang digunakan dalam domain frekuensi adalah Hertz (Hz) dengan kisaran antara 1–10 Hz. Beberapa batuan dan mineral memiliki kisaran nilai chargeabilitas (domain waktu) seperti pada Gambar 5 [12].

Secara teoritis setiap batuan memiliki daya hantar listrik dan nilai tahanan jenis yang berbeda-beda. Faktor-faktor yang berpengaruh antara lain: komposisi litologi, kondisi batuan, komposisi mineral yang dikandung, kandungan fluida, dan faktor eksternal lainnya. Batuan yang mengandung U/Th di desa Takandeang dan Boteng umumnya dijumpai pada *autobreccia*, *tuffities conglomerate* dan *phonolitic lava* yang telah mengalami proses pelapukan ataupun alterasi. Karena kandungan mineral lempungnya, batuan yang telah mengalami pelapukan ataupun alterasi tersebut pada umumnya akan memiliki nilai tahanan jenis lebih rendah. Chargeabilitas merupakan indikator adanya kehadiran mineral logam dalam suatu batuan, makin tinggi nilai chargeabilitas maka makin besar pula deposit logamnya atau merupakan zona potensi mineraliasi.



Gambar 5. Referensi nilai polarisasi terimbas dalam domain waktu untuk beberapa batuan dan mineral [8].

METODOLOGI

Untuk mendapatkan nilai tahanan jenis batuan dan chargeabilitasnya maka dilakukan pengukuran geolistrik. Kami mendefinisikan tahanan jenis dengan menggunakan contoh aliran arus listrik seragam melalui sampel. Dalam lingkungan lapangan, karena kita tidak dapat menciptakan jalur jalan seragam saat ini, kita memerlukan cara alternatif untuk menyimpulkan tahanan jenis. Pendekatan umum melibatkan penyuntikan arus antara dua elektrode yang bertindak sebagai sumber titik/wastafel dan kemudian mengukur penurunan voltase antara dua elektrode lainnya [9].

Pengukuran geolistrik tahanan jenis dan polarisasi terimbas menggunakan konfigurasi wenner secara dua dimensi (2D) (Gambar 6). Konfigurasi wenner digunakan untuk mendapatkan penetrasi kedalaman yang lebih baik dibandingkan konfigurasi lainnya.

Jalur pengukuran geolistrik ditentukan berdasarkan sebaran anomali radioaktivitas di daerah penelitian. Arah jalur dibuat memotong arah sebaran anomali radioaktivitas. Pembuatan jalur dilakukan dengan pemetaan kompas dan tali, serta bantuan alat navigasi *Global Positioning System* (GPS). Spasi elektrode ditentukan

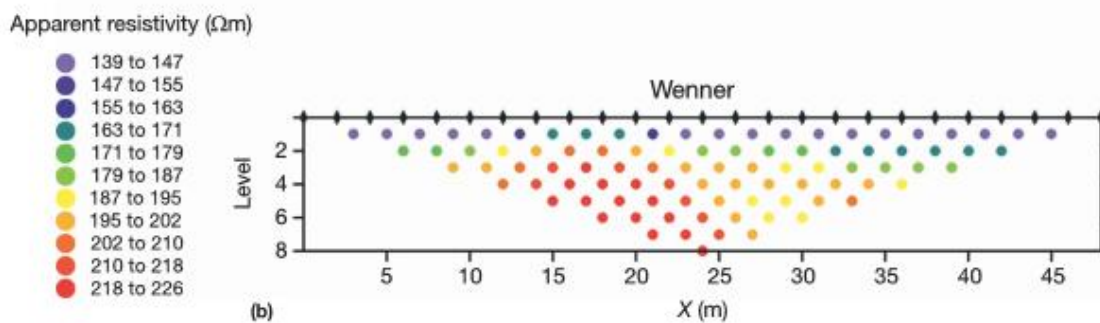
sejauh 10 m dengan panjang lintasan pengukuran di masing-masing jalur berkisar antara 300–500 m untuk mendapatkan penetrasi kedalaman maksimum sebesar 100–150 m dengan rata-rata kedalaman 30–50 m [13].

Dari hasil pengukuran yang dilakukan maka akan nilai tahanan jenis dan chargeabilitas semu yang belum dapat menggambarkan kondisi nilai sebenarnya. Untuk mendapatkan nilai sebenarnya maka dilakukan koreksi topografi dan inversi yang dilakukan menggunakan program RES2DINV. Hasil pengolahan menggunakan program tersebut dapat memberikan gambaran mengenai kondisi bawah permukaan secara lebih vertikal dan lateral [14].

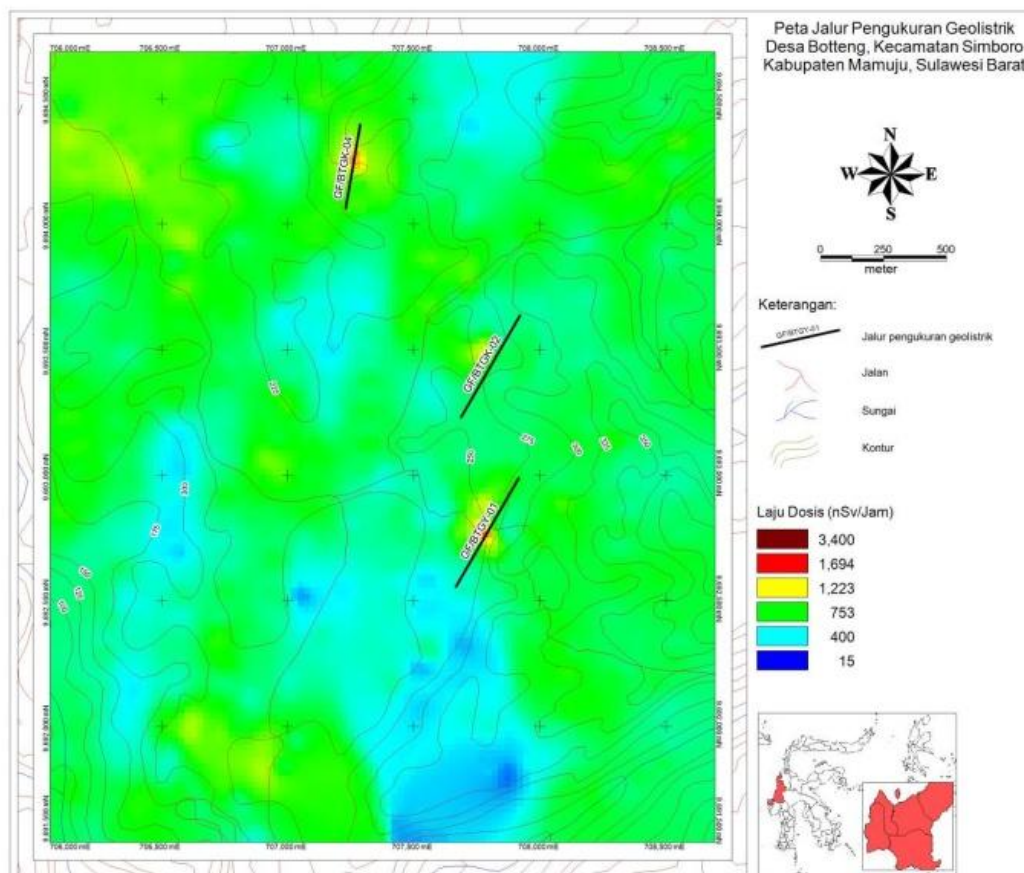
Survei geofisika dilakukan dengan metode geolistrik konfigurasi Wenner dan dipole-dipole, diawali dengan pembuatan enam jalur pengukuran masing-masing tiga jalur: GF/BTGY-01, GF/BTGY-02, dan GF/BTGY-04 berada di Desa Botteng (Gambar 7) dan tiga jalur lainnya: GF/TKDK-01, GF/TKDK-07, dan GF/TKDY-06 berada di desa Takandeang (Gambar 8) dengan panjang lintasan berkisar 300–500 m. Pembuatan jalur pengukuran

dilaksanakan dengan pembuatan patok-patok berjarak horizontal 10 meter untuk pemasangan elektrode pada pengukuran geolistrik. Pada patok selanjutnya diberi kode tertentu agar dapat dikenali dan memudahkan dalam pelaksanaan pengukuran. Jalur pengukuran dipilih sedemikian rupa dengan mempertimbangkan aspek teknis dan non-teknis. Aspek teknis diselaraskan dengan tujuan utama untuk mengetahui bentuk,

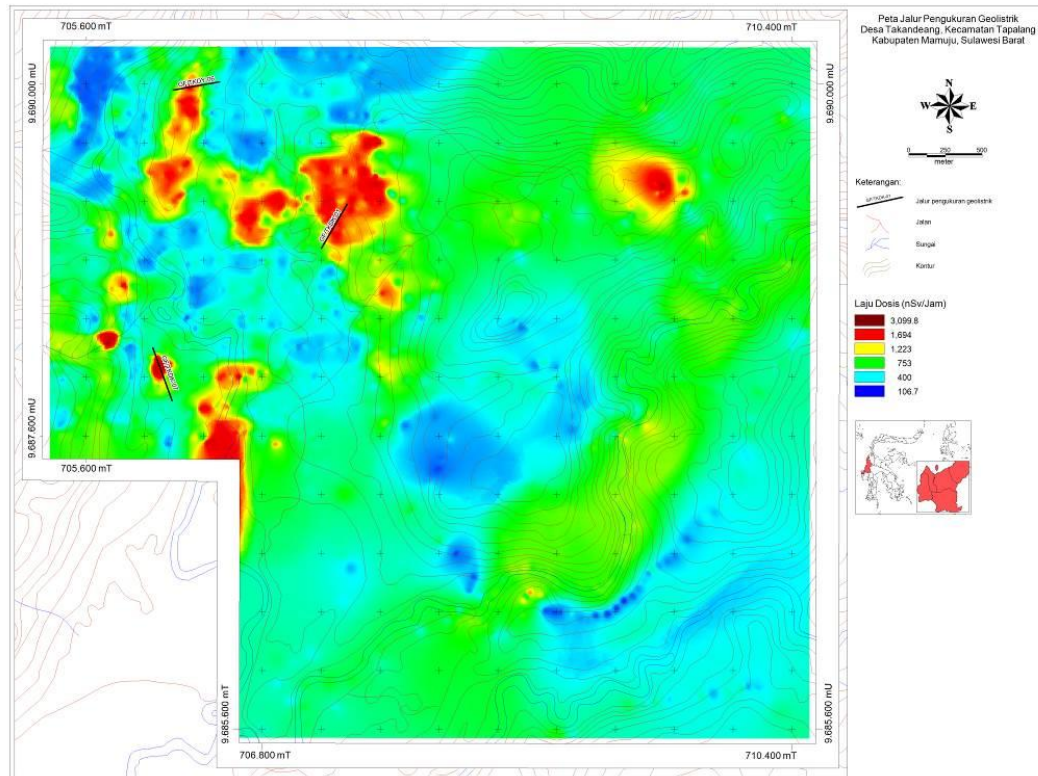
sebaran, kedalaman zona mineralisasi U/Th yang berasosiasi dengan unsur logam lainnya dan struktur yang berkembang di daerah sekitar rencana lokasi pemboran di desa Botteng dan Takandeang. Aspek non-teknis dipertimbangkan mengingat daerah penelitian merupakan bukit dengan lereng yang sangat terjal dan tidak memungkinkan dilaksanakan pengukuran geolistrik.



Gambar 6. Pengukuran geolistrik secara 2D menggunakan konfigurasi Wenner [9].



Gambar 7. Jalur pengukuran geolistrik di Desa Botteng dan sekitarnya.



Gambar 8. Jalur pengukuran geolistrik di Desa Takandeang dan sekitarnya.

Setelah pengukuran enam jalur selesai, dilakukan pengolahan data untuk merubah data tahanan jenis semu yang didapatkan dari lapangan menjadi data tahanan jenis sebenarnya. *Software* yang digunakan dalam pengolahan data adalah RES2DINV. Prinsip dasar dari pengolahan data tahanan jenis lapangan menggunakan *software* RES2DINV adalah melakukan iterasi data tahanan jenis semu, dikoreksi dengan topografi untuk mendapatkan data tahanan jenis sebenarnya lapisan batuan bawah permukaan. Dengan mengetahui tahanan jenis batuan bawah permukaan, digabung dengan pengetahuan mengenai karakteristik penyebaran batuan sumber U/Th dan zona mineralisasi ataupun alterasi di permukaan maka penyebaran zona mineralisasinya di kedalaman dapat diketahui sehingga dapat digunakan sebagai dasar penentuan lokasi pemboran.

Prinsip dasar pengukuran geolistrik adalah membedakan satuan litologi berdasarkan perbedaan tahanan jenis. Di lokasi penelitian zona mineralisasi/anomali thorium dan uranium diinterpretasikan terbentuk dalam beberapa proses geologi sebagai berikut [15]:

- Anomali thorium/uranium di daerah Takandeang berhubungan dengan alterasi dan telah mengalami pengkayaan thorium di bagian permukaan (*supergene enrichment*).
- Anomali uranium di daerah Botteng berhubungan dengan proses pelarutan dan pengendapan uranium akibat air meteorik pada batuan *tuffaceous conglomerate*. Uranium terdapat sebagai mineral sekunder pada matriks antara fragmen konglomerat. Pengamatan dari analisis UV memperlihatkan mineral sekunder gummit.

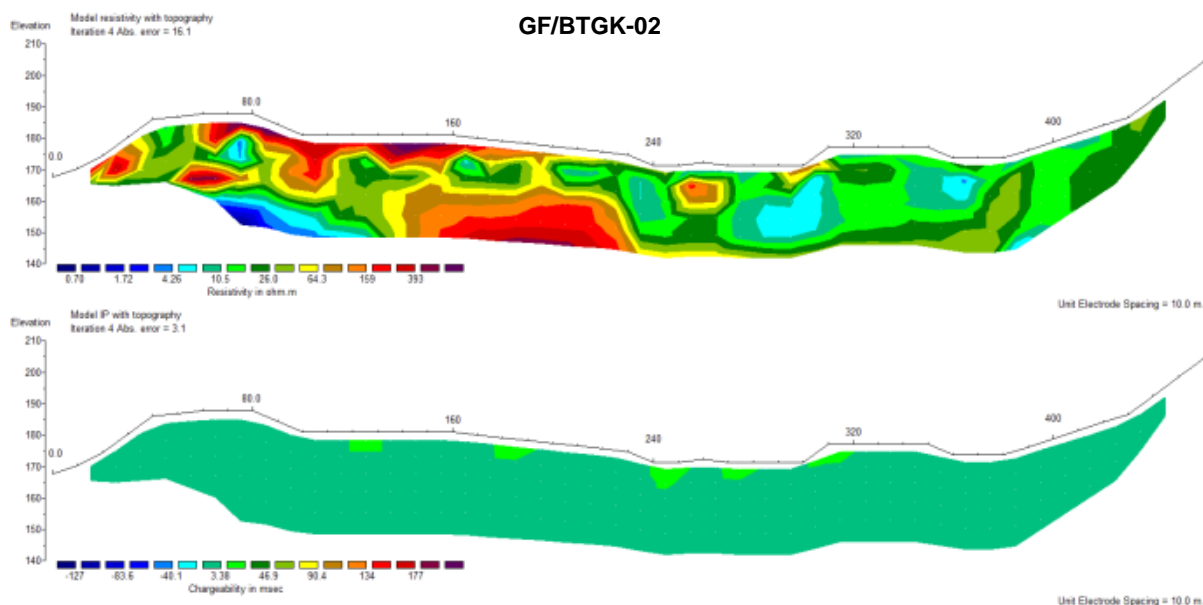
Breksi autoklastik, *phonolite* atau batuan jenis lain yang teralterasi atau berbeda kandungan mineral logamnya dapat dibedakan dengan batuan *autobreccia* ataupun *phonolitic* lava yang tidak teralterasi, yang tidak mengandung mineral logam dan bersifat masif berdasarkan perbedaan nilai tahanan jenis dan nilai chargeabilitas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

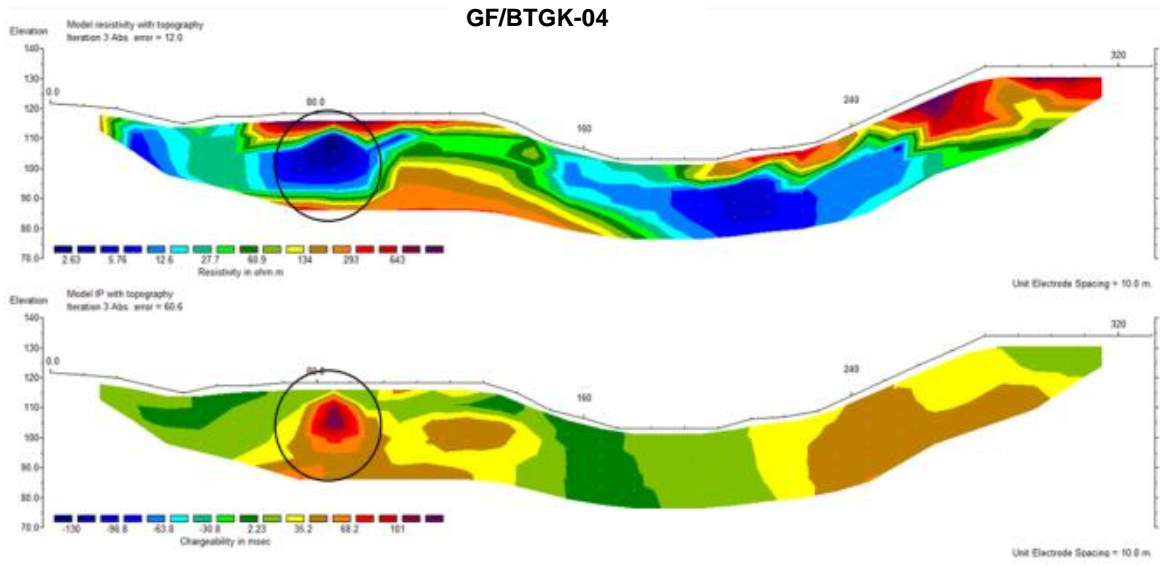
Dari hasil pengolahan data dapat dikenali adanya empat lokasi anomali pada tiga lintasan pengukuran yang berbeda dengan lebar anomali 30–70 m anomali. Keberadaan anomali tercermin dengan nilai chargeabilitas 59,2–531 ms dan nilai tahanan jenis 2,46–442 ohm-m. Anomali anomali tersebut berada pada sebaran batuan *autobreccia* terlihat jelas di lokasi GF/TKDY-6, GF/TKDK-07, dan GF/BTGK-04. Beberapa indikasi mineralisasi dipermukaan terlihat pada penampang GF/BTGK-02 dan GF/TKDK-01, dicirikan dengan anomali-anomali chargeabilitas

>25,14 ms di lintasan GF/BTGK-02 dan 81,4 ms di GF/TKDK-01.

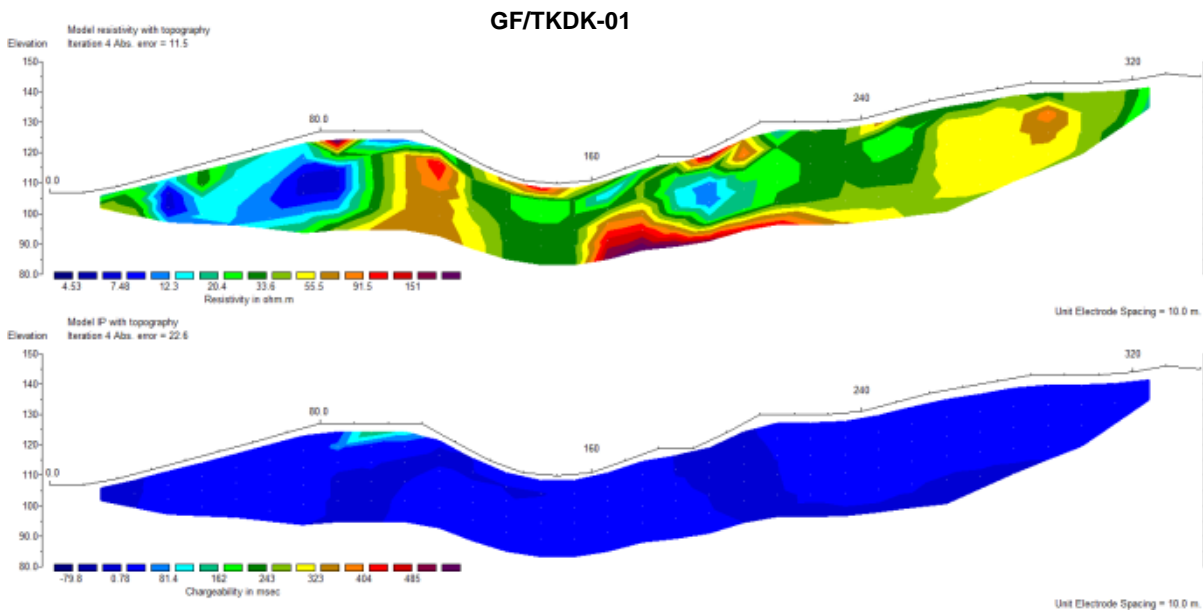
Dari hasil pengolahan tersebut dapat diperoleh duakelompok anomali nilai tahanan jenis dan chargeabilitas yang diinterpretasikan mewakili tubuh zona mineralisasi yang berbeda, yaitu anomali yang memiliki nilai tahanan jenis tinggi dengan nilai chargeabilitas tinggi yang diinterpretasikan mewakili tubuh batuan kompak dan massif (*autobreccia*) dengan kandungan mineral logam yang relatif tinggi dan nilai tahanan jenis yang rendah dan nilai chargeabilitas tinggi yang diinterpretasikan mewakili zona alterasi dengan kandungan mineral logam relatif tinggi yang diperkirakan mengandung U dan Th. Hasil kegiatan survey geofisika ini dengan didukung data permukaan menjadi dasar penentuan lokasi pemboran. Gambar 9–13 memperlihatkan penampang-penampang tahanan jenis dan chargeabilitas pada masing-masing jalur atau lintasan.



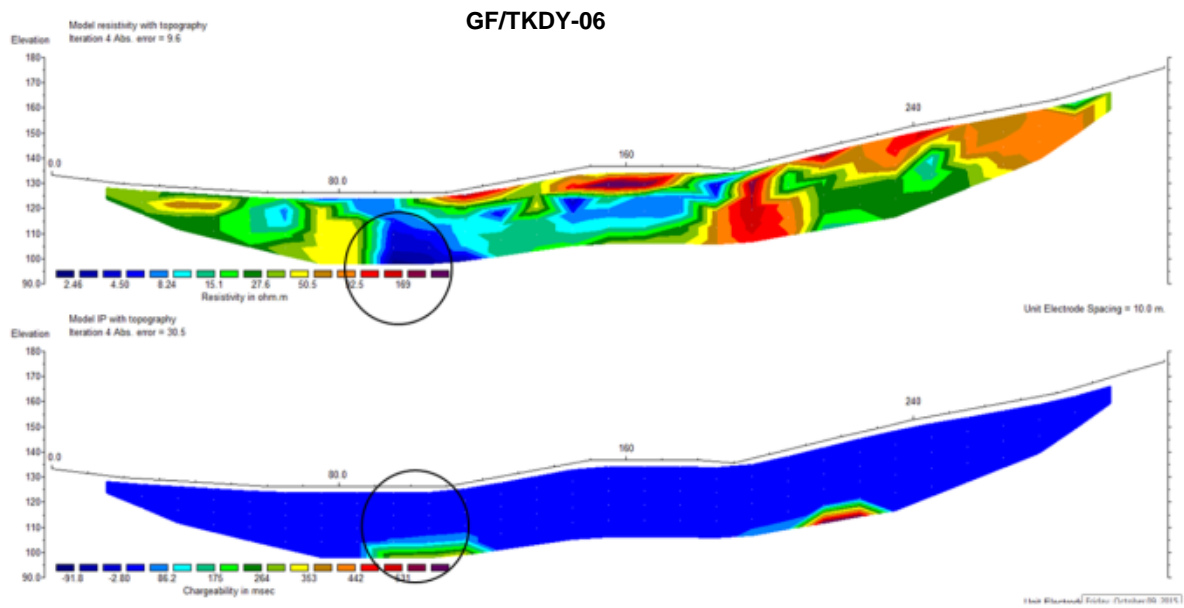
Gambar 9. Penampang tahanan jenis dan chargeabilitas jalur GF/BTGK-02.



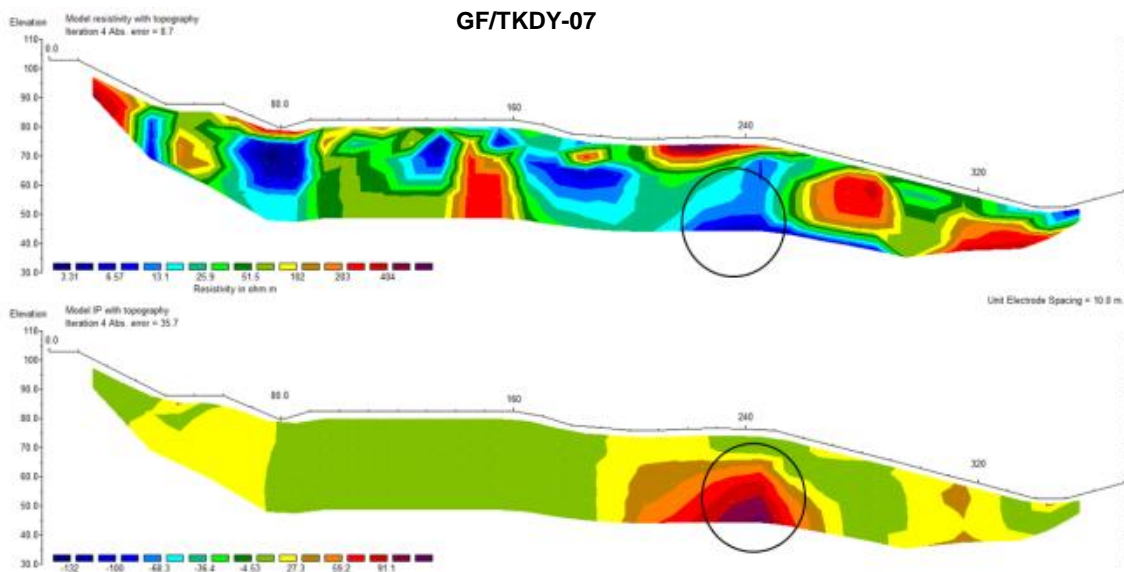
Gambar 10. Penampang tahanan jenis dan chargeabilitas jalur GF/BTGM-04.



Gambar 11. Penampang tahanan jenis dan chargeabilitas jalur GF/TKDK-01.



Gambar 12. Penampang tahanan jenis dan chargeabilitas jalur GF/TKDY-06.



Gambar 13. Penampang tahanan jenis dan chargeabilitas jalur GF/TKDY-07.

Metode tahanan jenis konfigurasi dipole-dipole digunakan untuk mendeteksi keberadaan struktur geologi berarah NW-SE di sekitar lokasi bor BTGY-01 yang diperkirakan mengontrol keberadaan keterdapatan U/Th di lokasi ini sehingga untuk mendeteksi ada tidaknya struktur ini digunakan metode dipole-dipole. Konfigurasi dipole-dipole sensitif dalam mendeteksi perubahan vertikal maupun secara horisontal

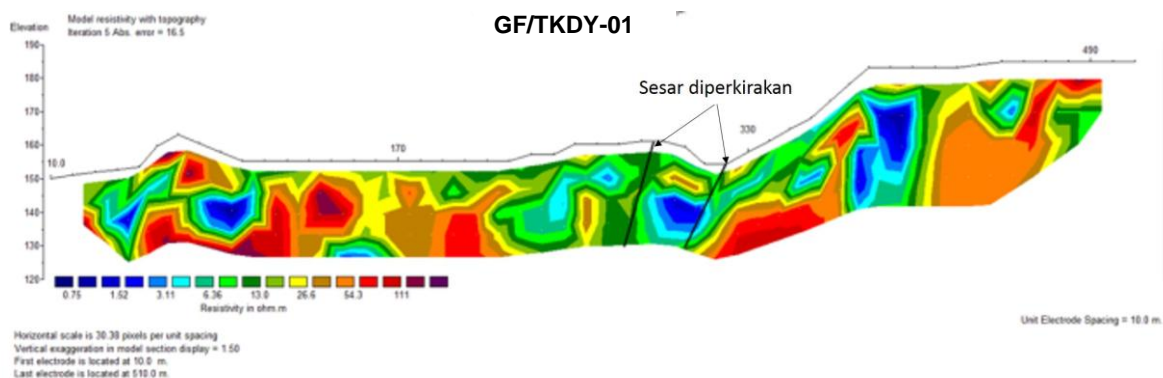
(lateral) dari suatu horison perlapisan batuan sehingga dengan konfigurasi ini diharapkan mampu memberikan gambaran kondisi bawah permukaan baik, berkaitan dengan struktur. Dari hasil pembuatan penampang tahanan jenis pada jalur ini terlihat ada indikasi horison dengan nilai tahanan jenis lebih tinggi terpotong oleh suatu zona dengan nilai tahanan jenis lebih rendah di meter 285 dan 310 yang merupakan cerminan keberadaan

struktur geologi. Zona dengan nilai tahanan jenis lebih rendah tersebut diinterpretasikan sebagai suatu zona lemah yang kemungkinan celah-celahnya telah terisi fluida (Gambar 14) yang menyebabkan zona tersebut memiliki nilai tahanan jenis yang relatif rendah dibandingkan dengan batuan sekitar.

Dari enam penampang tahanan jenis yang dihasilkan, tiga penampang menunjukkan hasil yang cukup menarik dan telah ditindaklanjuti dengan kegiatan pemboran. Penampang-penampang tersebut adalah GF/BTGK-04, GF/TKDY-06, dan GF/TKDK-07. Hasil dua pemboran yang telah dilaksanakan di jalur GF/TKDY-06, yaitu TKDY-06 dan TKDY-09 menunjukkan hasil yang relatif tidak jauh berbeda antara hasil interpretasi geofisika dengan hasil pemboran. Nilai tahanan jenis tinggi dan chargeabilitas tinggi pada penampang GF/TKDY-06 (TKDY-06) dari hasil pemboran merupakan cerminan batuan *autobreccia* banyak mengandung oksida besi. Sementara itu tahanan jenis rendah dan chargeabilitas tinggi dari penampang geofisika dari hasil pemboran merupakan cerminan batuan *autobreccia* yang telah mengalami kloritisasi. Nilai chargeabilitas tinggi dipengaruhi oleh kehadiran mineral pirit, galena, dan juga oksida besi pada kedalaman

27,30 meter pada batuan *autobreccia* yang telah teralterasi.

Kondisi yang relatif sama juga terjadi di lokasi pemboran TKDK-07. Dari penampang tahanan jenis sebenarnya jalur GF/TKDK-07 lokasi pemboran TKDK-07 ditunjukkan dengan nilai tahanan jenis rendah dan chargeabilitas tinggi di meter ke-200 sampai 270 penampang GF. Nilai ini merupakan nilai yang jauh lebih rendah daripada nilai tahanan jenis batuan yang mengandung uranium di Kalimantan Barat yang berada pada batuan dengan nilai tahanan jenis kurang dari 2.000 Ω m dan nilai faktor logam lebih dari 90 mho/m [16]. Hasil survey geofisika ini didukung data radiometri permukaan dipakai sebagai dasar penentuan lokasi pemboran. Hasil kegiatan pemboran yang dilakukan di TKDY-07 menunjukkan bahwa nilai resistivitas rendah dan chargeabilitas tinggi merupakan cerminan batuan *autobreccia* yang telah mengalami alterasi secara megaskopis dicirikan dengan kehadiran mineral pirit [10]. Secara alamiah batuan menjadi lebih konduktif karena fraktur dan rongga yang terbentuk akan jenuh air atau membentuk material berbutir halus yang dapat dikenali dengan pengukuran geolistrik [17].



Gambar 14. Penampang tahanan jenis sebenarnya jalur GF/BTGY-01 dengan konfigurasi dipole-dipole.

Dari hasil pengolahan data dapat dikenali adanya empat lokasi anomali pada tiga lintasan pengukuran yang berbeda dengan lebar anomali 30–70 m anomali. Keberadaan anomali tercermin dengan nilai chargeabilitas 59,2–531 ms dan nilai tahanan jenis 2,46–442 ohm-m. Nilai tahanan jenis yang memiliki nilai signifikan tinggi mengindikasikan daerah tersebut terdapat batuan kompak atau masif sukar mengalirkan listrik. Nilai chargeabilitas merupakan indikator adanya kehadiran mineral logam dalam suatu batuan, makin besar nilai chargeabilitas maka makin besar pula deposit logamnya atau zona potensi mineralisasi dan dipakai sebagai acuan dalam penentuan titik pemboran.

KESIMPULAN

Breksi autoklastik, lava ponolit, atau batuan jenis lain yang teralterasi atau berbeda kandungan mineral logamnya dapat dibedakan dengan batuan yang tidak teralterasi yang tidak mengandung mineral logam berdasarkan perbedaan nilai tahanan jenis dan chargeabilitasnya.

Anomali dengan nilai tahanan jenis tinggi dan chargeabilitas tinggi diinterpretasikan mewakili tubuh batuan kompak dan masif (breksi autoklastik) dengan kandungan mineral logam yang relatif tinggi sedangkan nilai chargeabilitas tinggi tapi nilai tahanan jenisnya rendah diinterpretasikan mewakili zona alterasi dengan kandungan mineral logam relatif tinggi yang diperkirakan mengandung U dan Th.

Nilai chargeabilitas merupakan indikator adanya kehadiran mineral logam dalam suatu batuan, makin besar nilai chargeabilitas maka makin besar pula deposit logamnya atau zona potensi mineralisasi. Nilai anomali yang

signifikan akan dipilih sebagai daerah lokasi pemboran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ir. Agus Sumaryanto, M.S.M sebagai Kepala Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian di daerah Mamuju. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada rekan-rekan kerja dan lapangan yang telah banyak membantu di dalam pengambilan data dan diskusi yang terkait

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Iskandar, Syarbaini, and Kusdiana, "Map of Environmental Gamma Dose Rate of Indonesia," National Nuclear Energy Agency, Jakarta, 2014.
- [2] H. Syaeful, I. G. Sukadana, and A. Sumaryanto, "Radiometric Mapping for Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) Assessment in Mamuju, West Sulawesi," *Atom Indones.*, vol. 40, no. 1, pp. 33–39, 2014.
- [3] I. G. Sukadana, A. Harijoko, and L. D. Setijadji, "Tectonic Setting of Adang Volcanic Complex in Mamuju Region, West Sulawesi Province," *Eksplorium*, vol. 36, no. 1, pp. 31–44, 2015.
- [4] I. G. Sukadana, F. . Indrastomo, and H. Syaeful, "Geology and Radionuclide Ratio Mapping For Radioactive Mineral Exploration in Mamuju, West Sulawesi," in *Prosiding Seminar Teknologi Energi Nuklir*, 2015, pp. 140–147.
- [5] F. D. Indrastomo, I. G. Sukadana, A. Saepuloh, A. H. Harsolumakso, and D. Kamajati, "Volcanostratigraphy Interpretation of Mamuju Area Based on Landsat-8 Imagery Analysis," *Eksplorium*, vol. 36, no. 2, pp. 71–88, 2016.
- [6] W. Lawrie, *Fundamentals of Geophysics*, 2nd Edition. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [7] A. A. Kaufman and B. I. Anderson, *Methods of Electrical Profiling and Mapping*, 1st ed., vol. 44, no. 10. Elsevier B.V., 2010.
- [8] M. H. Loke, "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," 2001.
- [9] A. Binley, "Tools and Techniques: Electrical Methods," in *Treatise on Geophysics*, Elsevier B.V., 2015, pp. 233–259.
- [10] C. J. Mwenifumbo, B. E. Elliott, C. W. Jefferson, G. R. Bernius, and K. A. Pflug, "Physical Rock Properties from the Athabasca Group: Designing

- Geophysical Exploration Models for Unconformity Uranium Deposits,” *J. Appl. Geophys.*, vol. 55, no. 1–2, pp. 117–135, 2004.
- [11] J. Park, K. H. Lee, H. Seo, J. Ryu, and I. M. Lee, “Role of Induced Electrical Polarization to Identify Soft Ground/Fractured Rock Conditions,” *J. Appl. Geophys.*, vol. 137, pp. 63–72, 2017.
- [12] G. V. Gurin, A. V. Tarasov, Y. T. Il'in, and K. V. Titov, “Transient Characteristics of Induced Polarization in Inhomogeneous Media (from Results of 2D Numerical Simulation),” *Russ. Geol. Geophys.*, vol. 58, pp. 624–634, 2017.
- [13] J. L. Porsani, V. R. Elis, and F. Y. Hiodo, “Geophysical Investigations for the Characterization of Fractured Rock Aquifers in Itu, SE Brazil,” *J. Appl. Geophys.*, vol. 57, no. 2, pp. 119–128, 2005.
- [14] H. F. Liu, J. X. Liu, R. W. Guo, X. Z. Tong, L. Gong, and Y. H. Peng, “Development of Multi-Channel Observation and Inversion for IP Electrical Sounding Method,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 24, no. 3, pp. 816–823, 2014.
- [15] I. G. Sukadana, H. Syaeful, F. D. Indrastomo, K. S. Widana, and E. Rakhma, “Identification of Mineralization Type and Specific Radioactive Minerals in Mamuju, West Sulawesi,” *J. East China Univ. Technol.*, vol. 39, no. December, pp. 39–48, 2016.
- [16] D. Haryanto, Supriyanto, B. Soetopo, and A. J. Karunianto, “Interpretasi Deposit Uranium Berdasarkan Data Tahanan Jenis dan Polarisasi Terinduksi di Sektor Rabau Hulu,” *Eksplorium*, vol. 36, no. 2, pp. 97–108, 2015.
- [17] K. Z. Seminsky, R. M. Zaripov, and V. V. Olenchenko, “Interpretation of Shallow Electrical Resistivity Images of Faults: Tectonophysical Approach,” *Russ. Geol. Geophys.*, vol. 57, no. 9, pp. 1349–1358, 2016.